

文章编号: 1000-5870(2001)02-0087-04

埋地输油管道的断裂失效概率评估

帅 健, 蔡强康, 吕英民

(石油大学机电工程学院, 北京 102200)

摘要: 利用 Monte-Carlo 模拟方法编制了断裂失效概率的计算程序, 并对某输油管道进行了实例计算。计算结果表明, R6 通用曲线、R6 附录 8 的 C-Mn 曲线、CVDA-84 压力容器缺陷评定规范和 K_I 因子等 4 种断裂判据在服役初期的差别微小, 但在服役后期, 它们之间的差别增大。在所有的参数中, 初始裂纹深度、断裂韧性、流变应力和管道壁厚等参数对管道断裂失效概率的影响最大, 选定的概率分布类型对失效概率的计算结果也有影响。利用水压试验方法可以明显地降低管道在运行时的断裂失效概率。

关键词: 输油管道; 裂纹; 断裂; 失效概率; 使用寿命

中图分类号: TE 973; O 346. 1 文献标识码: A

引 言

近几年来, 利用高分辨率的管道检测器能够检测到在用管线的缺陷分布及其发展状况。现代检测清管器不仅能查明管道缺陷, 而且能以相当高的精度指出这些缺陷的特性和量度^[1~3], 从而为管道的失效概率评估提供了保障。英国国际天然气管线完整性公司在世界范围内已经成功地对多条管线进行了评定^[4]。我国对此研究起步较晚, 差距较大。相信在今后的时间里, 管道失效概率或可靠性评估将在我国的油气管线的日常维护中得到越来越多的应用和发展。

1 埋地管道的失效概率

按照可靠性的一般理论^[5], 可以把管道的抗断裂失效归结为结构功能, 设 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为描述管道状态的基本变量(例如管道几何和材料性能参数), 则管道功能函数可表示为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

通常, 描述管道的基本变量 x_i 为随机变量, 管道的可靠度可表述为管道处于可靠状态的概率, 其表达式为

$$P_r = P[Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0]. \quad (2)$$

同理, 定义管道的失效概率为

$$P_f = P[Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0]. \quad (3)$$

描述管道断裂失效的功能函数由断裂力学工程判据给出, 有关规范给出的判据^[6~8]主要有以下几种: 线弹性断裂理论的评定方法(K_I 判据), CVDA-84 压力容器缺陷评定规范; D-M 模型的失效评定曲线(R6 通用失效评定曲线), 新 R6 标准失效评定曲线, R6 附录 8 的曲线。

2 Monte-Carlo 模拟法

按照失效评定图法计算管道的断裂失效概率, 形式上比较复杂, 涉及的因素也比较多。用解析的方法很难得到解答, 必须应用 Monte-Carlo 法, 通过随机模拟和统计试验来求解。

设基本变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的分布函数分别为 $F_{x_1}(x_1), F_{x_2}(x_2), \dots, F_{x_n}(x_n)$, 令

$$F_{x_i}(x_i) = \eta_i, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

其中, η_i 是由 Monte-Carlo 法产生的随机序列中的一个数, 这样有

$$x_i = F_{x_i}^{-1}(\eta_i), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

将这组值代入功能函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 便得出功能函数的一个取值。该值若小于零, 则在计算程序中记入一次功能函数的实现; 若大于零, 则不记入。这样在计算机中就完成了一次预定的计算, 再对另一个随机数重复进行这些计算, 直到完成所有随机数的计算为止。假设计算机中进行的总循环数为 K 次, 得到 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ 的次数为

收稿日期: 2000-03-18

基金项目: 中国石油天然气总公司石油中青年创新基金

作者简介: 帅健(1963—), 男(汉族), 湖北黄梅人, 教授, 硕士, 目前从事工程力学与油气储运工程方面的研究。

m 次, 只要 K 足够大, 便可以得出结构的失效概率为

$$P_f = \frac{m}{K} \quad (6)$$

这里 P_f 为结构失效概率的估计值。

按照上述方法, 编制了埋地管道失效概率分析的计算机程序 BPFA (Buried Pipeline Failure Analy-

sis)。该程序中包括多种随机因素, 用于计算管道裂纹在操作工况下的失效概率和逐年失效概率。

3 算例及结果分析

对某输油管道的断裂力学试验数据和其他数据进行了统计分析, 管道主要参数的概率分布和分布参数列于表 1。

表 1 某输油管道主要参数的概率分布及分布参数

管道参数	概率密度	分布参数	
		母材	焊缝
初始裂纹深度 a/m	$\lambda \exp(-\lambda a) / (1 - \exp(-\lambda a_u))$	$\lambda = 1000$ $a_u = 0.023$	
运行压力 P/MPa	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\mu = 5.8$ $Cov = 0.05$	
壁厚 t/mm	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\mu = 6.078$ $Cov = 0.011$	
断裂韧性 $K_{IC}/(MPa \sqrt{m})$	$\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right]$	$\alpha = 3.52$ $\beta = 181.6$	$\alpha = 2.42$ $\beta = 148.94$
屈服应力 σ_y/MPa	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\mu = 458.4$ $Cov = 0.08$	$\mu = 489.7$ $Cov = 0.07$
拉伸强度 σ_b/MPa	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\mu = 548.7$ $Cov = 0.07$	$\mu = 619.8$ $Cov = 0.05$
流变应力 $\bar{\sigma}_0/MPa$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\mu = 521.6$ $Cov = 0.075$	$\mu = 554.8$ $Cov = 0.06$
Paris 常数 C	$\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2}\right]$	$\ln \mu = -9.4822$ $Cov = 0.006$	$\ln \mu = -8.8878$ $Cov = 0.034$

3.1 模型敏感性分析

为了比较在服役初期、中期或后期采用不同判据计算失效概率的差别, 分别选择 R6 通用曲线、R6 附录 8 的 C-Mn 曲线、CVDA-84 压力容器评定规范和 K_I 因子等判据计算了逐年失效概率, 所得结果见图 1。

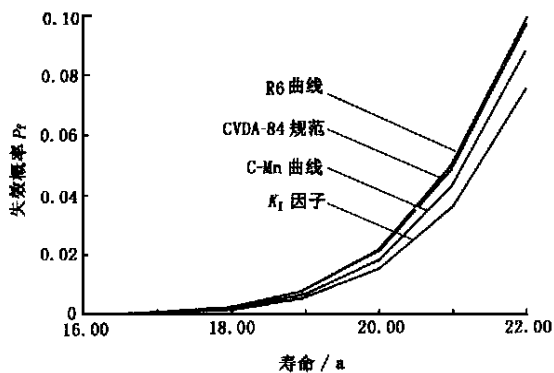


图 1 4 种判据的模型敏感性分析结果

小的; 在服役后期, 其差别随使用时间的增长而增大。按 R6 通用曲线计算的失效概率 P_f 最大, 表明它具有较高的安全裕度, 这是因为 R6 方法考虑了由裂纹扩展量大引起塑性失稳失效的情形; CVDA-84 方法和 R6 通用曲线比较接近, 但其安全裕度略小于 R6 通用曲线判据; K_I 判据的安全裕度最小; 由于附录 8 的 C-Mn 曲线中考虑了加工硬化, 其安全裕度小于 R6 通用曲线。

3.2 参数敏感性分析

影响管道断裂失效概率的因素有壁厚 t 、管径 R 、管内压力、初始裂纹深度、断裂韧性 K_{IC} 和流变应力 σ_0 等诸多因素, 参数敏感性分析的目的在于得到对失效概率影响最大的几个参量。

图 2 给出 P_f 分别与壁厚 t 、管径 R 、管内压力 p 的变异系数的关系曲线, 其中假设各参量为正态分布。从图中可以看出, 壁厚的变异系数对 P_f 的影响很大, 而 R 和 p 的变异系数对 P_f 的影响程度基本相同, 两者的影响程度都不大。

在服役初期, 各种判据的失效概率的差别是微

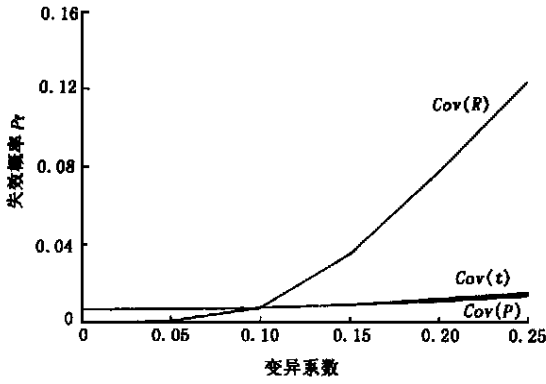


图 2 失效概率随变异系数的变化

图 3 给出 P_f 分别与初始裂纹深度 a 、断裂韧性 K_{IC} 和流变应力 σ_0 的变异系数的关系曲线, 其中假设各参量为正态分布。可以看出, 初始裂纹深度 a 对 P_f 的影响很大, 因此应予以严格控制。而断裂韧性的变异系数 $Cov(K_{IC})$ 和流变应力的变异系数 $Cov(\sigma_0)$ 的影响次之, $Cov(K_{IC})$ 的影响略大于 $Cov(\sigma_0)$ 。但是, 随着变异系数的加大, $Cov(\sigma_0)$ 对 P_f 的影响有超过 $Cov(K_{IC})$ 的趋势。

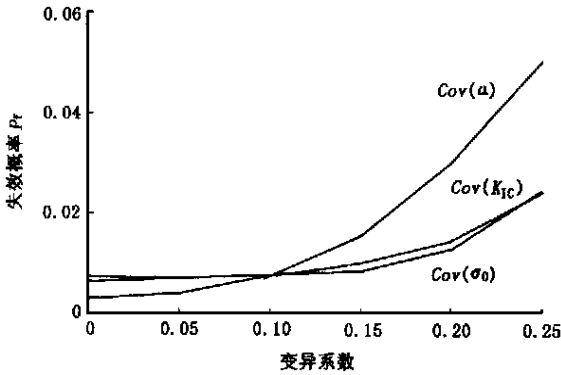


图 3 失效概率随变异系数的变化

假定初始裂纹深度 a 为指数分布, 断裂韧性为二参数威布尔分布, 其余变量均为正态分布, 可得到 P_f 与 $1/\lambda$ 的关系曲线, 见图 4。初始裂纹深度 a 为指数分布时, 其均值和方差与 $1/\lambda$ 成正比, 因此, 随着 $1/\lambda$ 的增大, a 的均值和方差增大, 断裂失效概率急剧增大。

当断裂韧性为威布尔分布时, P_f 随尺度参数 β 的变化规律见图 5。随着尺度参数 β 的增大, 断裂失效概率 P_f 减少; 威布尔分布的形状参数 α 越小, 引起的断裂失效概率 P_f 越大。不同的形状参数 α 能使威布尔分布分别与指数分布、正态分布非常接近, 因此可以看出, 不同的分布对失效概率的影响很大。

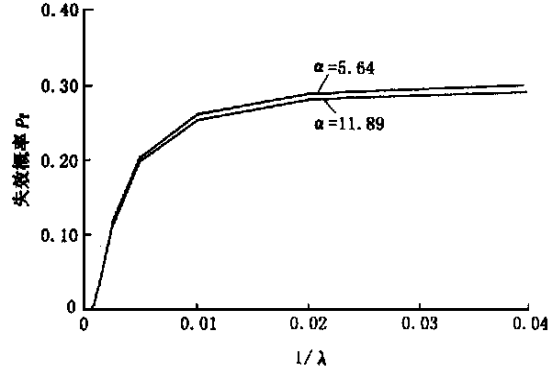


图 4 失效概率随 $1/\lambda$ 的变化

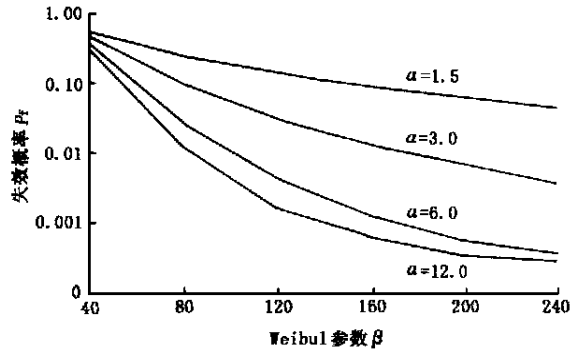


图 5 失效概率随威布尔参数 β 的变化

3.3 水压试验对失效概率的影响

输油管道在现场施工完毕后, 都要进行预定的水压试验。利用水压试验可以发现大的裂纹, 更换不合格的管子, 排除较为严重的裂纹。该输油管道在经过水压试验的多次修复以后, 基本上可以排除掉深度大于 2.3 mm 的裂纹。在这种情况下要进行精确的计算, 裂纹深度的分布必须进行截尾, 即排除存在深度 2.3mm 以上裂纹的情况。

图 6 给出排除大于 2.3 mm 缺陷后管道的 P_f 与 $1/\lambda$ 的关系曲线。由于裂纹深度 a 与 $1/\lambda$ 成正比, 图 6 表明, 经过水压试验后, 随着裂纹深度 a 的增加, 失效概率 P_f 达到最大值, 随后有所下降, 且不再随裂纹深度 a 的指数分布参数 $1/\lambda$ 的增加而变化。图中 α 表示断裂韧性的二参数威布尔分布中的分布参数。

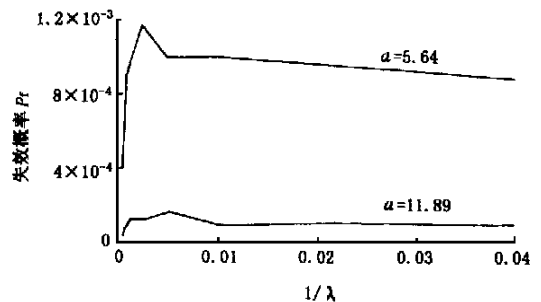


图 6 排除大于 2.3 mm 缺陷后管道的 P_f 与 $1/\lambda$ 的关系曲线

图 7 为经历水压试验和假设未经历水压试验的轮库输油管道母材及缝材料的 P_f 与 $1/\lambda$ 的关系曲线。后者的 P_f 值要比前者高出几倍, 这足以说明水压试验对降低 P_f 的作用明显的。

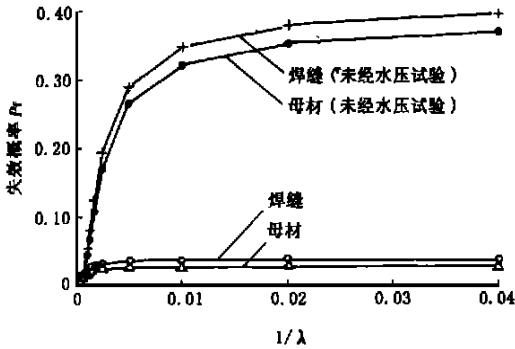


图 7 管材及焊缝的 P_f 与 $1/\lambda$ 的关系曲线

3.4 管道逐年失效概率计算

图 8 给出该管道管材和焊缝材料的逐年失效概率。失效判据选用 R6 附录 8 的失效评定曲线。考虑到利用水压试验已排除了存在深度大于 2.3 mm 裂纹的情况, 因此只评定初始裂纹深度小于 2.3 mm 管道的逐年失效概率。从图中可以看出, 焊缝材料的断裂失效概率明显高于母材, 这是因为焊缝材料的断裂韧性低于母材, 并且材料常数的分散性较大。用概率的方法能充分地考虑材料性能参数的分散性对管道强度的影响。

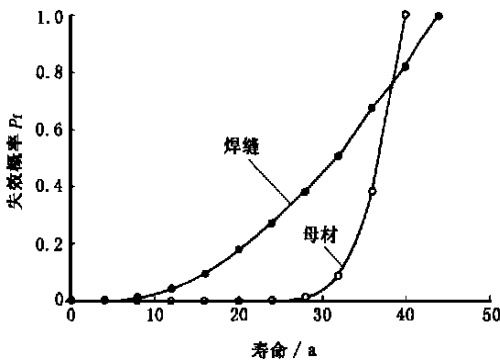


图 8 管材和焊缝材料的逐年失效概率

4 结 论

(1)用 R6 通用曲线、R6 附录 8 的 C-Mn 曲线、CVDA-84 压力容器规范和 K_I 因子四种判据评定了

断裂情况, 在服役初期的评定结果差别微小, 在服役后期, 它们之间的差别增大。

(2)在所有的参数中, 初始裂纹深度、断裂韧性、流变应力和管道壁厚对管道断裂失效概率的影响最大; 选定的概率分布类型也对失效概率的计算结果产生影响。

(3)用水压试验可以明显地降低管道在运行时的断裂失效概率。

(4)运用概率方法评估管道, 能充分考虑材料性能的分散性对断裂失效概率的影响。

(5)利用所编制的管道失效概率分析计算机程序, 能计算管道裂纹在操作工况下的失效概率和逐年失效概率, 可以估算出管道的剩余寿命。

参考文献:

- [1] BROWN P J. 10 Years of intelligent pigging: an operations view [A]. Pipeline Pigging and Inspection Conference [C]. Houston, organized by Pipes & Pipelines International, Februry, 1990.
- [2] NESPECA G A, HVEDING K B. Intelligent Pigging of the Ekofisk-Emiden 36 inch gas pipelines [A]. 63rd Annual Technical Conference [C]. Society of Petroleum Engineers, Houston, March, 1988.
- [3] SCHAEFER E F. Pigging of subsea pipeline [A]. Off-shore Technology 23rd Annual Conference (Houston) Proceedings [C]. OTC 6769, 1991. 637-643.
- [4] JONE D. Pipeline inspection; the key to a reliable future [J]. Corros Prevent Contr, 1997, 44(1): 3-16.
- [5] 何水清等, 著. 结构可靠性分析与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [6] 尼柯尔斯 R W 主编. 压力容器技术进展——1: 缺陷分析 [M]. 李泽震, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [7] 荆树峰, 等. 国外压力容器缺陷评定标准 [M]. 北京: 劳动出版社, 1982.
- [8] 尼柯尔斯 R W 主编. 压力容器技术进展——5: 规范和标准 [M]. 李建国, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [9] 酃正能, 何庆芝. 工程断裂力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.

(责任编辑 吕 鹏)

LIU Di-jun, ZHANG Guang-qing, QIU Wei-de and FENG Qi-ning/ LABORATORY STUDY ON THE SENSOR FOR MEASURING INTERNAL PRESSURE AND AXIAL FORCE OF OIL STRING/ 2001, 25(2): 84 ~ 86

A two-parameter sensor for measuring internal pressure and axial force of the oil string, which is suitable to the on site and real time operation, is proposed. The corresponding hardware for measuring circuit is designed. It is not needed to punch the tubing when this sensor is used to measure the internal pressure, which guarantees the oil string with higher mechanical strength and keeps wells in normal production. This sensor is crucial to supervise the forces on the oil string and can provide the optimization of the production technology in practical oilfields.

Key words: oil string; internal pressure; axial force; sensor; measurement

About the first author: LIU Di-jun, male, received BS degree from the University of Petroleum in 1993. Now he is in pursuit of Ph. D degree and works on signal detection, transmission and processing in the University of Petroleum, China (Beijing: 102200).

SHUAI Jian, CAI Qiang-kang and LÜ Ying-min / ASSESSMENT ON FRACTURE FAILURE PROBABILITY OF BURIED PIPELINES / 2001, 25(2): 87 ~ 90

By means of Monte-Carlo simulation, a computer program named as BPFA (Buried Pipeline Failure Analysis) is developed and applied to compute failure probability related to various kinds of random factors. As examples, the actual analyses about an oil pipeline are given. The results demonstrate that the difference of assessment using R6 general curve, C-Mn curve in R6 appendix 8, CVDA-84 specification for pressure vessel and K_I factor theory is small in the early stage of service, and it becomes larger in the late stage. Among all the parameters, initial defect depth, fracture toughness, flow stress, and pipe thickness have significant effects on the failure probability. The assigned styles of distribution of parameters have also effects on the failure probability. Proof test with water pressure could greatly reduce the failure probability of pipelines in service.

Key words: buried pipeline; crack; fracture; failure probability; work life

About the first author: SHUAI Jian, male, obtained MS degree from Beijing Graduate School of East China Petroleum Institute in 1987. Now he is a professor and works on the engineering mechanics at the Department of Mechanical and Electrical in the University of Petroleum, China (Beijing: 102200).

SHU Heng-mu / PLASTIC LIMIT LOAD OF CIRCUMFERENTIALLY CRACKED PIPES UNDER AXIAL FORCE, INTERNAL PRESSURE AND ASYMMETRICAL BENDING MOMENT/ 2001, 25(2): 91 ~ 94

The formulas for calculating plastic limit load of pipes with circumferential surface crack, embedded crack and through-wall crack under combined load of tensile force, asymmetrical bending moment and internal pressure are presented. The analytical results show that as the angle between crack longitudinal symmetrical section and bending moment applying section increases, the loading capability of pipe increases. The formulas are useful for safety assessment of defective pipe.

Key words: circumferential crack; pipe; internal pressure; axial force; asymmetrical bending moment; limit load

About the author: SHU Heng-mu, male, professor, is working on engineering mechanics and pipe safety evaluation at the Department of Civil Engineering in the University of Petroleum, China (Dongying: 257061).

HOU Mi-shan and QIAN Xiu-qing / ANTI-PLANE STRAIN PROBLEMS OF CURVILINEAR CRACKS IN PIEZOELECTRIC MATERIAL/ 2001, 25(2): 95 ~ 99

The analytic solution and the intensity factor of anti-plane strain problems of curvilinear cracks in piezoelectric materials are obtained by using the Faber series expansion of complex variable functions and solving Hilbert problem. The stress field is independent of the electric displacement loading, and the electric displacement field is independent of the stress loading while there only are stress and electric displacement loading on the boundary. The intensity factor of circular-arc